

TRABAJOS DE PREHISTORIA
54, n.º 1, 1997, pp. 155-165

LA APLICACIÓN DEL GPS A LA ARQUEOLOGÍA

*THE APPLICATION OF GPS
TECHNOLOGY IN ARCHAEOLOGY*

XESÚS AMADO REINO (*)

RESUMEN

La incorporación de la tecnología GPS a la arqueología es relativamente reciente y su uso cada vez mayor. Los excelentes resultados obtenidos en la georreferenciación de elementos arqueológicos han movido a muchos profesionales a la adquisición de equipos, unas veces profesionales y otras de bolsillo. Este trabajo pretende servir de presentación de esta tecnología exponiendo sus posibilidades y usos más frecuentes en arqueología, además de hacer una serie de puntualizaciones en cuanto a la fiabilidad, precisión de los diferentes tipos de receptores portátiles y formas de aplicación con carácter profesional de estos equipos.

ABSTRACT

The adoption of GPS technology in Archaeology is relatively recent and its use is increasing more and more. The excellent results obtained from the mapping of archaeological elements has led many archaeologists to acquire GPS systems, professional in some cases and pocket in other. This paper tries to introduce this technology, showing its possibilities and more frequent uses in archaeology. This contribution also tries to give a critical vision in the application of the different kind of receivers and the ways of professional use.

(*) Grupo de Investigación en Arqueología del Paisaje. Departamento de Historia I. Facultade de Xeografía e Historia. Universidade de Santiago de Compostela.

Este artículo fue remitido en su versión final el 5-II-97.

Palabras-clave: (GPS) Sistema de Posicionamiento Global. Corrección diferencial. Georreferenciación. Geodesia. Prospección arqueológica. Inventario. Catalogación. Arqueología.

Key words: (GPS) Global Positioning System. Differential correction. Geodesy. Archaeological Survey. Inventory. Archaeology. Mapping.

LA TECNOLOGÍA GPS Y SUS CARACTERÍSTICAS

El *Global Positioning System* (GPS) es un sistema apoyado por satélite que posibilita el conocimiento de nuestra posición exacta a cualquier hora del día o de la noche para cualquier punto del globo terrestre. Este sistema fue diseñado y desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América con fines estratégicos estrechamente ligados a su aplicación bélica. Esta finalidad estratégica inicial pronto fue cambiando para convertirse en una herramienta de enormes posibilidades para la sociedad civil. Entre sus muchas aplicaciones posibles destacan las de navegación, movimiento y localización en lugares de morfología extremadamente regular donde no existen puntos de referencia reconocibles.

Se fundamenta en una constelación de veinticuatro satélites (1) que giran en torno a la Tierra. Estos satélites describen una serie de órbitas a una

(1) El total de satélites es de 24, aunque tan sólo 21 son operativos y los otros tres son de reserva.

T. P., 54, n.º 1, 1997

distancia aproximada de 20.000 km. El funcionamiento de este sistema es relativamente sencillo, a pesar de la avanzada tecnología que requiere. Los satélites emiten una señal de radio constante, en la que se transmite información referida a su posición consignando el instante preciso en el que emite esta señal. El receptor, situado en un punto desconocido de la superficie terrestre, recibe la señal de un mínimo de tres o cuatro de estos satélites y por una serie de cálculos averigua su situación. Este principio de aparente sencillez no lo es tanto, ya que en este ejercicio de cálculo existen diversas variables que pueden llegar a falsear la medición substancialmente, por lo que todos estos aspectos deben ser evaluados y calcular las magnitudes de error que cada uno de ellos introduce (Ackroyd y Lorimer, 1990).

Lo primero que el receptor calcula cuando recibe la señal de uno de estos satélites es la distancia que lo separa del mismo. Esta se averigua merced a la precisión horaria que el satélite emisor incorpora en su señal, por lo que el receptor puede calcular el tiempo transcurrido desde la emisión hasta la recepción. Como se puede suponer, en este proceso la clave reside en la sincronización horaria a la que deben estar sometidos tanto el emisor como el receptor, para ello los satélites están dotados de un reloj atómico de alta precisión que permite una gran exactitud en la especificación del instante de emisión. Los receptores, gracias a los grandes avances experimentados por la relojería electrónica, también disponen de mecanismos de medición con una precisión de nanosegundo, es decir, una cienmilésima parte de segundo (Hurn, 1993a).

La señal viaja a una velocidad teórica de 300.000 km/seg. Se compone de dos frecuencias que a su vez portan unos códigos que son los que permiten al receptor identificar su momento de emisión. Los modos de lectura de esta información se corresponden con los dos tipos básicos de receptores: de *Código* y de *Fase*. En el primer caso el receptor trabaja con la primera de las frecuencias de la señal, identificando una secuencia relativamente corta de la información codificada. Es el llamado código C/A pseudo-aleatorio o código civil. Sucesión compleja de unos y ceros digitales con una estructura aparentemente aleatoria. Los satélites transmiten este código repitiéndolo cada milisegundo, por lo que el receptor, que ya conoce este patrón, averigua inmediatamente el momento de emisión (Logsdon, 1995).

Los receptores de Fase utilizan las dos frecuencias de la señal, leyendo el otro tipo de información llamada código P, o código preciso: una larga secuencia de modulaciones emitidas a una frecuencia muy diferente del anterior que se repite cada 267 días aproximadamente. Cada segmento de este código es único y exclusivo de cada satélite variando semanalmente, lo que confiere una precisión mucho mayor a aquellos sistemas que emplean esta información. El grado de error de las medidas corregidas es, en el primero de los casos de metros, mientras que en el segundo es apenas de unos pocos centímetros, razón por la cual estos receptores también son conocidos por el término *submétricos*.

Los dos tipos de receptores trabajan de dos modos diferentes: un GPS sin el apoyo de un segundo receptor que le sirva de estación de referencia trabaja en *modo autónomo*. El *trabajo en modo relativo* se apoya en una estación que se sitúa en un punto conocido. Esta modalidad es la base de la técnica GPS diferencial a la que nos referiremos más adelante. Otras distinciones en cuanto al modo de trabajo son las denominadas *modo estático* y *modo cinemático* según haya o no desplazamiento del receptor. El primero de ellos se refiere al trabajo realizado en un punto fijo sin que exista desplazamiento del receptor y el segundo modo es aquél en el que el receptor va recorriendo diversos puntos en funcionamiento continuo. Esta diferenciación es importante dado que en la actualidad la mayor parte de los equipos permiten ambos tipos de funcionamiento, aunque sus capacidades se ven ligeramente mermadas en el caso de trabajar en modo cinemático (Fig. 1). Las siglas RTK y RTCM que aparecen en la figura designan sistemas y protocolos de radiotrans-

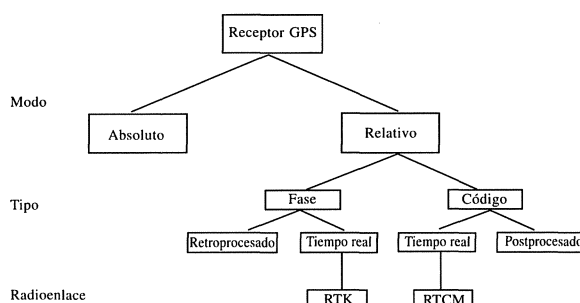


Fig. 1. Esquema de los modos de trabajo y tipos de receptor GPS.

misión de datos en tiempo real (Developed by RTCM Special Committee, 1991).

Un sistema GPS tiene tres partes fundamentales: el satélite, la señal y el receptor. Estos tres componentes están sometidos a una serie de “contratiempos” de diversa naturaleza que provocarán ciertos errores en las mediciones resultantes.

Las *fuentes de los errores* que pueden afectar al satélite son, por un lado, la imprecisión registrada por el reloj y por el otro cualquier desviación de su órbita. La precisión de los relojes de los satélites es altísima, pero cualquier variación mínima introduce una alteración en la medida. Las órbitas seguidas son perfectamente conocidas por los receptores, pero los efectos perturbadores de la capa superior de la atmósfera terrestre pueden modificarlas.

La velocidad de transmisión de la señal de radio también está sujeta a variaciones. A medida que la señal de GPS atraviesa primero las partículas cargadas de la ionosfera y posteriormente el vapor de agua de la troposfera la velocidad disminuye de forma sensible. El receptor no puede averiguar por sí mismo el grado de alteración que ha sufrido, pero este error se puede minimizar de forma considerable (aunque no totalmente) con la *corrección diferencial* (Hurn, 1993b).

Los receptores por su parte tampoco están exentos de problemas. Los errores multisenda consisten en la recepción múltiple de la misma señal procedente directamente del satélite e inmediatamente después sus rebotes en las superficies circundantes al receptor. El segundo tipo de error, los llamados *ruidos del receptor*, son fallos en la calidad de la señal debidos a causas diversas, pero sobre todo a la propia calidad del aparato receptor y a la falta de nitidez e interferencia con otras señales. El error multisenda se puede mitigar parcialmente incorporando *planos de tierra* en las antenas receptoras y estableciendo una máscara de elevación que discrimine aquellas señales que entren en la antena con un ángulo inferior al que nosotros establezcamos, teniendo en cuenta que cuanto mayor sea esta máscara de elevación más estaremos constriñendo nuestra ventana (2) de recepción. Esta es la forma de evitar la entrada de señales procedentes de los rebotes con el propio suelo.

(2) Se le llama ventana de recepción al espacio abierto situado sobre el receptor y del cual proceden las señales de los satélites sin que sean interrumpidas por edificios u objetos.

La fuente de error más importante (hasta tres veces superior a la suma de los máximos posibles de todos los anteriores) es la SA (*Selective Availability*) o *disponibilidad selectiva* (3), dispositivo que introduce el Departamento de Defensa de los Estados Unidos que consiste en una alteración con carácter aleatorio en la medida variando segundo a segundo. Este mecanismo establece los errores estándar de un receptor de GPS en torno a los 100 m de radio con respecto a su posición real. La altitud presenta una variación mucho mayor. La consecuencia práctica es que, cuando el receptor se encuentra en el campo, las coordenadas suministradas no son unas coordenadas constantes que sabemos defectuosas y que pueden ser corregidas posteriormente, sino que van a ser tantas medidas distintas como instantes de medición (4) hayan transcurrido, con lo que se necesita guardar ese archivo con las medidas y los tiempos en los que fueron efectuadas para realizar el procesado posterior de todas ellas y su corrección.

EL GPS DIFERENCIAL

Un receptor de GPS de campo facilita unas coordenadas aproximadas de localización cuya magnitud de desviación potencial alcanza los 200 m. Aunque puede reducirse considerablemente con la corrección diferencial (Hurn, 1993b).

El *GPS diferencial* implica el empleo de dos receptores simultáneamente. El primero, estático, se sitúa en un punto cuyas coordenadas conocemos con mucha precisión (*estación de referencia*). Este receptor almacena en un archivo el volumen total de información proporcionada por la constelación de satélites durante el transcurso de las mediciones de campo. La finalidad de este archivo es calcular posteriormente las magnitudes de error con que cuentan las señales de cada uno de esos satélites visibles en cada instante de medición. El cálculo se realiza contrastando los valores obtenidos con la posición real de la estación de referencia.

(3) En realidad se trata de dos dispositivos, cada uno de ellos actúa modificando a una de las dos frecuencias, en el caso de la L₁ se llama *Disponibilidad Selectiva*, en el de la L₂ *Anti-fraude*; de modo general suele utilizarse el primero de los nombres para designar a ambos mecanismos, ya que los dos tienen la misma función y son establecidos por el Departamento de Defensa.

(4) La frecuencia de medición la establece el usuario del receptor en función de sus propias necesidades.

El segundo de los receptores es una unidad portátil que se desplaza por los puntos que deben ser georreferenciados, con lo que a su vez se genera el archivo de valores no corregidos. La combinación de los dos archivos da como resultado un fichero con el conjunto de las medidas ya corregidas. Son mitigadas las alteraciones debidas a los relojes de los satélites, a los cambios en la órbita y la disponibilidad selectiva. Los restantes errores también son fuertemente corregidos excepto los que afectan al propio receptor (ruido y multisenda).

Estas correcciones pueden realizarse en *tiempo real* o *postprocesado*. La primera transmite las correcciones a través de un radioenlace a los equipos portátiles obteniendo durante el propio trabajo de campo los valores reales. El postprocesado conlleva el almacenamiento y traslado de los archivos de campo para su posterior corrección en gabinete. El funcionamiento en tiempo real está limitado por las características de los sistemas de radioenlace cuyas capacidades de alcance reducen las posibilidades de trabajo a distancias relativamente cortas, entre 15 y 20 km de radio en el entorno de la estación de referencia (5), aunque estas cifras pueden variar de forma substancial en función de la orografía de la zona y según la tecnología de enlace que se utilice.

El nivel de precisión que nos permite este mecanismo diferencial, bien sea en tiempo real o en postprocesado, es del orden de 1 a 2.5 m de radio de desviación máxima en el caso de los receptores de código. Su límite es el nivel de alcance que se establece en los 500 km (6) de distancia entre el receptor de referencia y el portátil, dado que más allá de esta distancia la constelación de satélites cambia, por lo que no podríamos calcular el grado de imprecisión de las medidas proporcionadas por algunos de los satélites con los que el receptor portátil pudo haber estado trabajando (Fig. 2).

Los desarrollos más recientes tratan ya de conciliar la constelación de GPS rusa, conocida como GPS-GLONASS, con la americana que es la que hasta el momento venían usando los re-

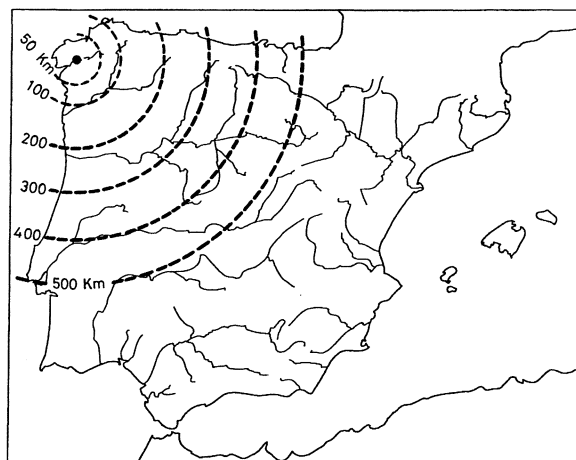


Fig. 2. Localización y alcance de una Base Comunitaria de GPS. Su precisión disminuye a razón de 1 m cada 100 Km.

ceptores actuales. La transcendencia de este hecho reside, por un lado, en el aumento considerable del número de satélites que permitirá un mayor posibilidad de recepción de señales y por el otro en la mayor exactitud que aportará el sistema ruso al estar libre del mecanismo de disponibilidad selectiva.

LOS DIFERENTES TIPOS DE EQUIPAMIENTO

La oferta de equipos profesionales de GPS en el Estado Español se concentra en torno a bases comunitarias, receptores portátiles con diferentes características y capacidades de almacenamiento, estaciones totales y sistemas de radioenlace que permiten el trabajo en tiempo real.

Los equipos de bases comunitarias para la toma de datos pueden adquirirse a partir de un millón cuatrocientas mil pesetas, lo que incluye tanto el equipo como el software de captura de datos (7). Los receptores portátiles son de muy diversos tipos y capacidades por lo que sus precios varían entre los más baratos y sencillos de algo más de las doscientas mil pesetas a modelos con características superiores y mayor capacidad

(5) Existen opciones para el establecimiento de radioenlaces consecutivos que amplían el radio de cobertura, aunque su aplicación es difícil y costosa.

(6) La precisión no tiene el mismo valor a lo largo de esos 500 km sino que va variando, siendo óptima en el radio de los primeros 50 km. Su grado de error aumenta a medida que la distancia a la estación de referencia es mayor, a razón de 1 m por cada 100 km aproximadamente.

(7) La instalación de la base comunitaria debe realizarse siguiendo unas indicaciones muy precisas, que incluyen la construcción de un vértice geodésico sobre el que se instala la antena.

de almacenamiento cuyo precio se aproxima a las cuatrocientas mil pesetas. Este es quizás el tipo de modelo más adecuado para la mayor parte de los usuarios profesionales. El software de tratamiento y corrección de estos equipos supera en todos los casos el precio del aparato receptor, con lo que el paquete de ambos componentes tiene un precio muy superior. Las estaciones totales presentan todavía mayor diversidad en función de un sinfín de características, accesorios, capacidades y software complementarios. Sus precios superan los dos millones y medio hasta alcanzar cifras en torno a los seis u ocho millones. Los sistemas topográficos adaptados para el trabajo en tiempo real superan los cinco millones de pesetas. Los receptores submétricos más baratos se sitúan por encima del millón de pesetas e incluyen varios componentes.

La tecnología GPS se ha popularizado con un nuevo producto: los *GPS de bolsillo*. Instrumentos de pequeño formato y de precio relativamente asequible que nos permiten averiguar nuestra posición aproximada con facilidad. El grado de precisión de estos aparatos es variable. Estos equipos ofertan unas precisiones máximas en condiciones óptimas que varían desde los 10 a los 100 m. Su precio en el mercado ha descendido considerablemente en los últimos tiempos y es posible que siga haciéndolo; en la actualidad estos equipos pueden adquirirse por precios que rondan las 100.000 pts o incluso más baratos.

Las características técnicas que presentan son muy favorables, en principio: numerosos canales de recepción, capacidades de almacenamiento aparentemente amplias, escasos límites para la obtención del máximo de precisión, etc. Pero sin embargo esto no es totalmente cierto. Estos equipos reducen los márgenes de variación amparándose en su mayor capacidad de recepción simultánea de las señales de satélites, lo cual no es garantía suficiente para una localización más exacta, dado que son muchos los errores a los que están sometidas sus mediciones.

APLICACIONES ARQUEOLÓGICAS

El mundo arqueológico está en estos momentos en pleno proceso de incorporación a la "moda" GPS (English Heritage, 1995: 49). En algunas instituciones inglesas ya han sido adoptados los equipos de precisión submétrica de modo

sistemático (8). En los EEUU la aplicación experimental en Arqueología es anterior, pero su uso más generalizado se registra a partir de 1994. En nuestro Estado la adopción de esta tecnología va más rezagada aunque se va incrementando de forma progresiva (Lam. I).



Lám. I. El trabajo de campo requiere de un equipamiento básico, compuesto de antena y receptor portátil.

La posibilidad de apoyo en esta tecnología puede tener lugar en diversos momentos de la práctica arqueológica. La primera de ellas es el propio apoyo en las labores de topografía y levantamientos planimétricos de las fases preliminares

(8) En el caso de English Heritage nuestro grupo de trabajo ha servido como precedente para la adopción del GPS a través del profesor Richard Bradley, quien tuvo la oportunidad de experimentar con nosotros la eficacia del sistema durante un trabajo de prospección de grabados rupestres en Galicia.

de una intervención arqueológica. En este momento el GPS no sólo aportará una gran precisión, sino que también dotará de agilidad al trabajo permitiendo unos rendimientos excelentes en un tiempo inferior al que sería necesario con la topografía clásica. La segunda de las facetas en las que puede intervenir es en la georreferenciación de las diferentes cartografías empleadas en los procesos de análisis territorial y planteamiento de la intervención. Esta labor consistirá principalmente en la comprobación de las coordenadas de los puntos comunes de los diferentes sistemas y colecciones cartográficas que se manejen.

Una de las aplicaciones de mayor potencial es la generación de Modelos Digitales del Terreno, lo que generalmente se conoce como MDT. En la actualidad existen ya diversos productos en el mercado que combinan la posibilidad de incorporar datos procedentes de trabajos de campo con GPS y la generación de triangulaciones, curvados y modelos tridimensionales sin necesidad de ningún paso intermedio. Generalmente estas aplicaciones son desarrollos específicos de aplicaciones topográficas y de delineación, una de las más usadas es Autocad y como consecuencia de ello varios de estos MDT son compatibles con este programa de delineación. El avance y desarrollo de estos productos puede conducir en breve a la desaparición de buena parte de los trabajos topográficos en arqueología que serán sustituidos por simples recorridos sistemáticos de la superficie del yacimiento con un aparato de GPS.

Finalmente, la utilización fundamental se produce en forma de apoyo topográfico durante el proceso de excavación y la toma de coordenadas de los elementos arqueológicos, así como los cálculos de medidas, extensiones y superficies. Un caso específico es la definición de áreas de carácter diverso que al contar con la ayuda del GPS quedará reducido a un recorrido por sus límites sin que sea necesaria la realización de complicados cálculos y largos trabajos de campo.

Algunos proyectos arqueológicos han diseñado soluciones específicas para sus problemas concretos como es el caso del *Fallen Timbers Archaeology Project* (9) de Ohio que pretendía localizar los restos de una batalla de 1794 en las proximidades de Maumee. La superficie que era necesario prospectar presentaba un relieve prác-

ticamente homogéneo, al tiempo que los árboles impedían reconocer puntos de referencia en el terreno. La solución adoptada fue la prospección superficial de tres corredores paralelos en los que se fueron dando coordenadas GPS a los distintos artefactos localizados con el detector de metales. El resultado de la prospección fue la obtención de unas nubes de puntos que representaban la dispersión de restos metálicos en la zona y consecuentemente el área en la que se concentraban el mayor número de ellos.

La necesidad de localizar con un alto grado de precisión todo tipo de restos está presente en muchos proyectos arqueológicos pero en algunos casos como en el de los petroglifos esta necesidad se incrementa. En *El Morro National Monument* (New Mexico) se localizan un total de 17.000 petroglifos que la legislación obligó a proteger y preservar en 1990, la mayor parte de estos grabados se encuentran sobre una roca volcánica fácilmente erosionable que los coloca en peligro de desaparición. El altísimo número de elementos que deben ser posicionados obliga a buscar una solución rápida, en este caso la corrección en tiempo real permitió el ahorro de miles de horas de procesamiento de gabinete (Fletcher y Sánchez, 1994). Otro ejemplo parecido es el ofrecido por los restos de una embarcación sajona en Essex que puso al descubierto una marea viva y que volverían a ser tapados por la arena en pocos días. En este caso el empleo del GPS fue imprescindible en primer lugar para trazar un área de protección para los restos y en segundo lugar fue posible realizar un modelo ideal de la embarcación (Shope *et alii*, 1995).

Un proyecto en el que nosotros hemos tenido la oportunidad de participar ofrece otro ejemplo de aplicación del GPS, en este caso con una orientación patrimonial. El campamento romano de Cidadela (10) (Sobrado dos Monxes, A Coruña) es uno de los pocos campamentos romanos que se localizan en Galicia. Nuestro grupo de trabajo ha sido el encargado de realizar un sistema de Información (11) que contemple el yacimiento y su entorno, para lo que fue necesario considerar la localización de los diferentes elementos

(10) Este yacimiento, que presenta un magnífico estado de conservación, es propiedad de la Xunta de Galicia y está siendo excavado sistemáticamente por el profesor Caamaño Gesto de la Universidade de Santiago de Compostela.

(11) El diseño y programación del Sistema de Información de Cidadela corrió a cargo de César Antonio González Pérez, miembro del Grupo de Investigación en Arqueología del Paisaje.

(9) *Fallen Timbers Archaeological Project* es un proyecto dirigido por G. Michael Pratt del Historical Archaeological Research, INC.

tanto arqueológicos como etnográficos, etc. Concretamente, la localización con GPS tuvo que atender en primer lugar a la georreferenciación del mapa catastral de la zona, las cartografías de detalle y los dibujos de excavación en los que se situaban las principales estructuras del yacimiento. Una segunda fase del trabajo de campo establecerá los perímetros de las áreas con distintos niveles de protección exigidas por la legislación vigente.

GPS Y ARQUEOLOGÍA: ALGUNAS PRECISIONES

La adopción de este tipo de tecnologías no siempre ha conseguido el rigor y la eficacia que se perseguía, en muchos casos por haber acudido a equipos de bajo coste que no ofrecían gran fiabilidad en los resultados. Por todo ello, creemos necesarias una serie de advertencias de carácter general acerca del uso y la calidad de los resultados, en función de dos aspectos básicos: la precisión que confieren los distintos tipos de receptores y la necesidad de la corrección diferencial de esos resultados.

Nuestro Grupo de Investigación viene utilizando los receptores GPS desde hace tres años (12), lo que le confiere un bagaje nada despreciable en el tema, que ha permitido la valoración crítica de las ventajas e inconvenientes de la técnica.

En un primer momento hemos utilizado los receptores portátiles de GPS para diferentes trabajos de prospección arqueológica, inventario y evaluación de impacto arqueológico en la construcción de obras públicas en Galicia. En este caso en concreto, la adopción de esta tecnología era imprescindible ante la necesidad perentoria de localizar con precisión los restos y estructuras que se encontraban en las proximidades de las diferentes actuaciones y que corrían el riesgo de verse afectados.

Las coordenadas obtenidas resultaron tener una fiabilidad aceptable en algunos casos, pero en otros no. Esto último se puede entender de forma clara con un ejemplo gráfico: en una zona de fuerte concentración de petroglifos como el Concello de Campolameiro, decenas de rocas

grabadas se localizan en un área de doscientos metros de radio, con lo que la variación sensible que sufren las coordenadas de GPS no diferencial no sólo hace al sistema inoperante sino que además genera confusión dado que será imposible volver a localizarlos e identificarlos correctamente siguiendo esas coordenadas. Otros errores que pueden llegar a ser incluso más graves son los derivados de la localización de elementos arqueológicos en el marco de un proyecto de evaluación de impacto arqueológico. La coordenada puede estar desplazada varios metros, lo que puede ocasionar la destrucción del yacimiento en el momento de ejecución de las obras. En la figura 3 se puede observar cómo una serie de yacimientos arqueológicos situados en un área muy reducida se pueden convertir en una maraña de difícil identificación, ante la cual la única solución es la aplicación de la corrección diferencial de las coordenadas tomada con GPS.

Los primeros años de experiencia nos han llevado a adoptar la corrección diferencial de coordenadas de forma sistemática (13). Las coordenadas tomadas con anterioridad carecen no sólo de exactitud sino que, en la mayor parte de los casos conducen a la introducción de errores incontrolables tanto en las localizaciones cartográficas como en las conclusiones derivadas de las posiciones ocupadas por los restos y estructuras.

Las principales aplicaciones arqueológicas de esta tecnología están destinadas a la *localización* exacta de yacimientos y estructuras de naturaleza arqueológica y su *delimitación*. La primera es necesaria para la mayor parte de los trabajos arqueológicos, bien sean éstos de investigación, intervención, gestión, etc. Las políticas de prevención y protección del Patrimonio han generado e impulsado la segunda.

En el momento de acometer la elaboración de nuevas leyes de Patrimonio una de sus finalidades básicas es la protección y preservación del Patrimonio estableciendo la obligación de delimitación de los yacimientos inventariados o de aquellos que hayan de ser declarados Bien de Interés Cultural. Aunque esto no sea una obligación generalizada en estos momentos, se trata de una tendencia clara de las diferentes administraciones

(12) Agradecemos a Víctor Fernández las primeras informaciones suministradas sobre el GPS, ya que a ellas debemos la decisión de adoptar esta tecnología.

(13) Los equipos de GPS para la realización de corrección diferencial de coordenadas fueron adquiridos con una ayuda para equipamiento de infraestructura de investigación concedida en 1994 por la *Consellería de Educación e Ordenación Universitaria* de la *Xunta de Galicia*.

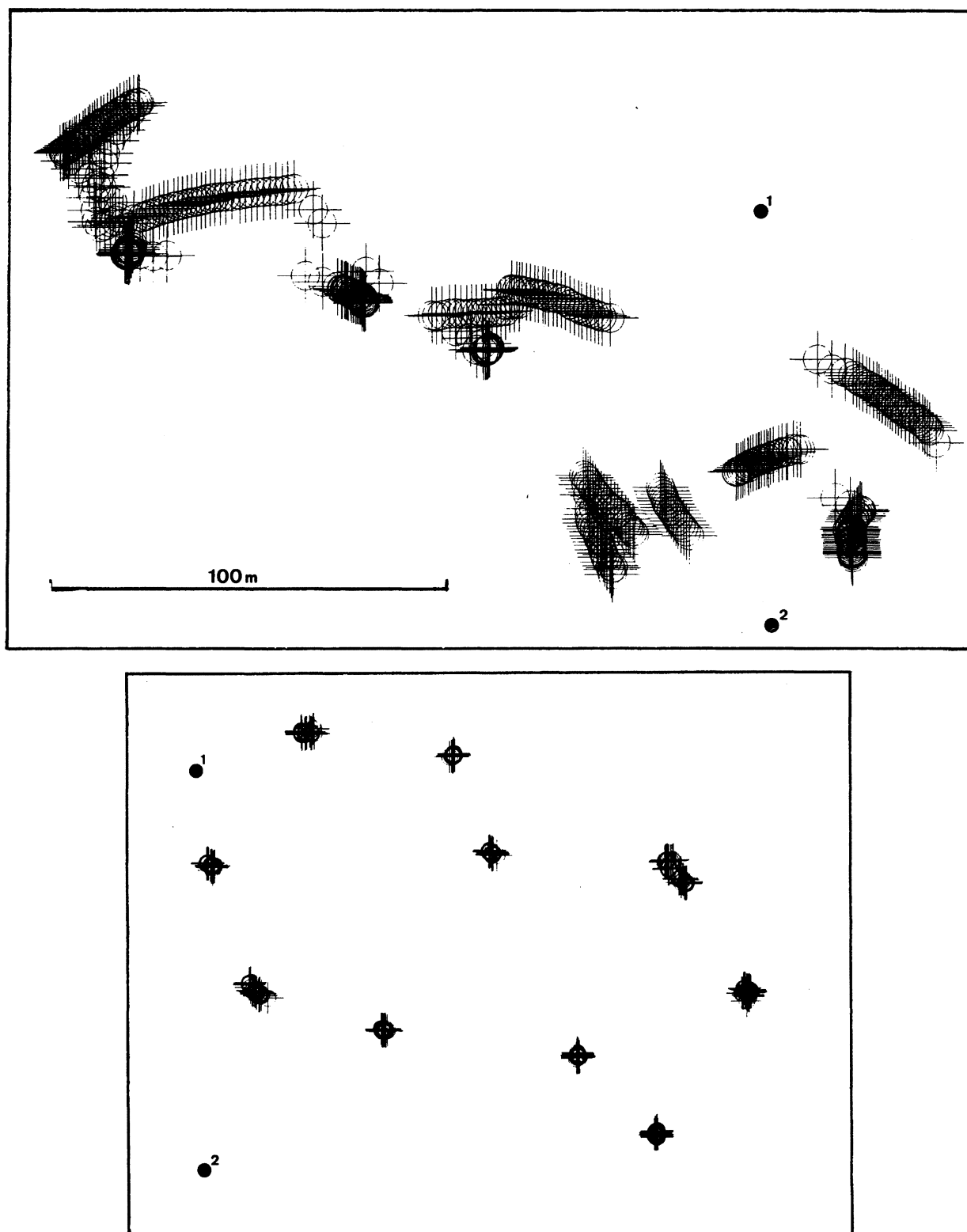


Fig. 3. Distribución de las coordenadas antes y después de la corrección diferencial. Los puntos numerados representan el mismo lugar en la realidad.

T. P., 54, n.º 1, 1997

encargadas del tutelaje del patrimonio, no sólo del arqueológico, sino del cultural en general.

Es necesario pasar de la concepción del yacimiento arqueológico como un punto concreto y comenzar a entenderlo como lo que es: un espacio en el que se recuperan materiales u observan estructuras y que se reconoce como susceptible de ser delimitado, aunque en la mayor parte de los casos esto resulte bastante difícil, el GPS permite establecerlo. Se puede ir más allá en el ejercicio de delimitación e incluir un margen mínimo de seguridad. En cualquier caso, para ello es necesaria una precisión lo más exhaustiva posible. La figura 4 lo muestra gráficamente.

Las posibilidades de apoyo que ofrecen estos sistema de georreferenciación no se agotan en el interior del propio campo de la arqueología sino que nos pueden llegar a ayudar a la hora de calibrar otras herramientas de trabajo como las propias cartografías (14). Para el caso de Galicia dos de las colecciones cartográficas más corrientes en el trabajo arqueológico son la colección 1:10.000 de la *Conselleria de Ordenación do Territorio e Obras públicas* que suele utilizarse en su versión reducida a escala 1:20.000 y la del *Instituto Geográfico Nacional* a escala 1:25.000. Sometidas a contrastación con el sistema de GPS diferencial estas dos cartografías en zonas de trabajo concretas hemos podido comprobar que las magnitudes de error de las coordenadas oscila entre los 15 y los 45 m en el primer caso y hasta un máximo de 15 m en el segundo.

Si bien estos errores pueden ser despreciados para la mayor parte de los trabajos, lo que ya no es tan despreciable son los errores de las cartografías llamadas de detalle, cuyas escalas se sitúan por debajo del 1:5.000 y donde los errores pueden llegar a ser importantes. En la mayor parte de los planos de detalle, sobre todo los destinados a trabajos en zonas concretas, suelen utilizarse sistemas de referencia que si bien tienen el aspecto de un sistema de coordenadas y de esta forma funcionan, no reflejan con exactitud el sistema universal, sino que los valores varían a veces de forma estándar y otras de forma progresiva, por lo que su calibración se hace imprescindible.

(14) En el caso de las cartografías del Instituto Geográfico Nacional, esta institución ofrece la posibilidad de proporcionar las coordenadas de los vértices geodésicos representados en los mapas, dirigiéndose a sus servicios centrales en Madrid: General Ibáñez de Ibero, 3, 28003 Madrid. Fax: (91) 553 29 13. También se pueden solicitar a los diferentes servicios territoriales.

La utilización del GPS permite la automatización, hacia la que cada día se tiende más, a la hora de exportar los datos de campo a diferentes Sistemas de Información Geográfica. Para ello resultan idóneas las posibilidades de intercambio de información que ofrecen los software de los sistemas profesionales de GPS y no los equipos de bolsillo. La utilización de equipos de precisión submétrica permite elaborar croquis o levantamientos planimétricos sencillos realizando recorridos simples sobre estructuras, límites o ejes imaginarios de sección del yacimiento.

CONCLUSIONES

La implantación de estos equipos es tremendamente reciente, pero las aplicaciones del GPS y del GPS diferencial crecen a medida que se incrementa el conocimiento de su existencia y potencialidad. La clave para entender este amplio abanico de aplicaciones, que se extiende cada vez más, es el nivel de precisión alcanzado por el GPS diferencial, que sitúa a este sistema más allá de una simple técnica de navegación convirtiéndose en una herramienta con capacidad de medición de casi todo tipo de posiciones, superficies y movimientos. La excepción son los trabajos en los que resulta imposible la recepción directa de las señales emitidas por los satélites como túneles, interiores de edificios, bosques espesos, proximidades extremas de edificaciones de notable tamaño y superficies cubiertas en general.

Estos aparatos de bolsillo ciertamente pueden ser ideales para aquellos aficionados que puedan permitirse la adquisición de estos sistemas para sus prácticas deportivas, pero de ningún modo pueden satisfacer unos requerimientos profesionales de precisión y alta fiabilidad, dado que el tratamiento y corrección posterior de la información almacenada es inviable.

No es necesario el uso de GPS para obtener una única coordenada en el interior de áreas de grandes dimensiones como reservas naturales, parajes, playas, bosques, etc. para los que no aporta mayor exactitud y sí mayores costes. La delimitación de estos elementos sí debe acudir a la técnica GPS que, con un simple recorrido por su perímetro y un procesado sencillo, proporciona de modo ágil el contorno deseado.

La georreferenciación con GPS diferencial es necesaria para la localización puntual de entidades

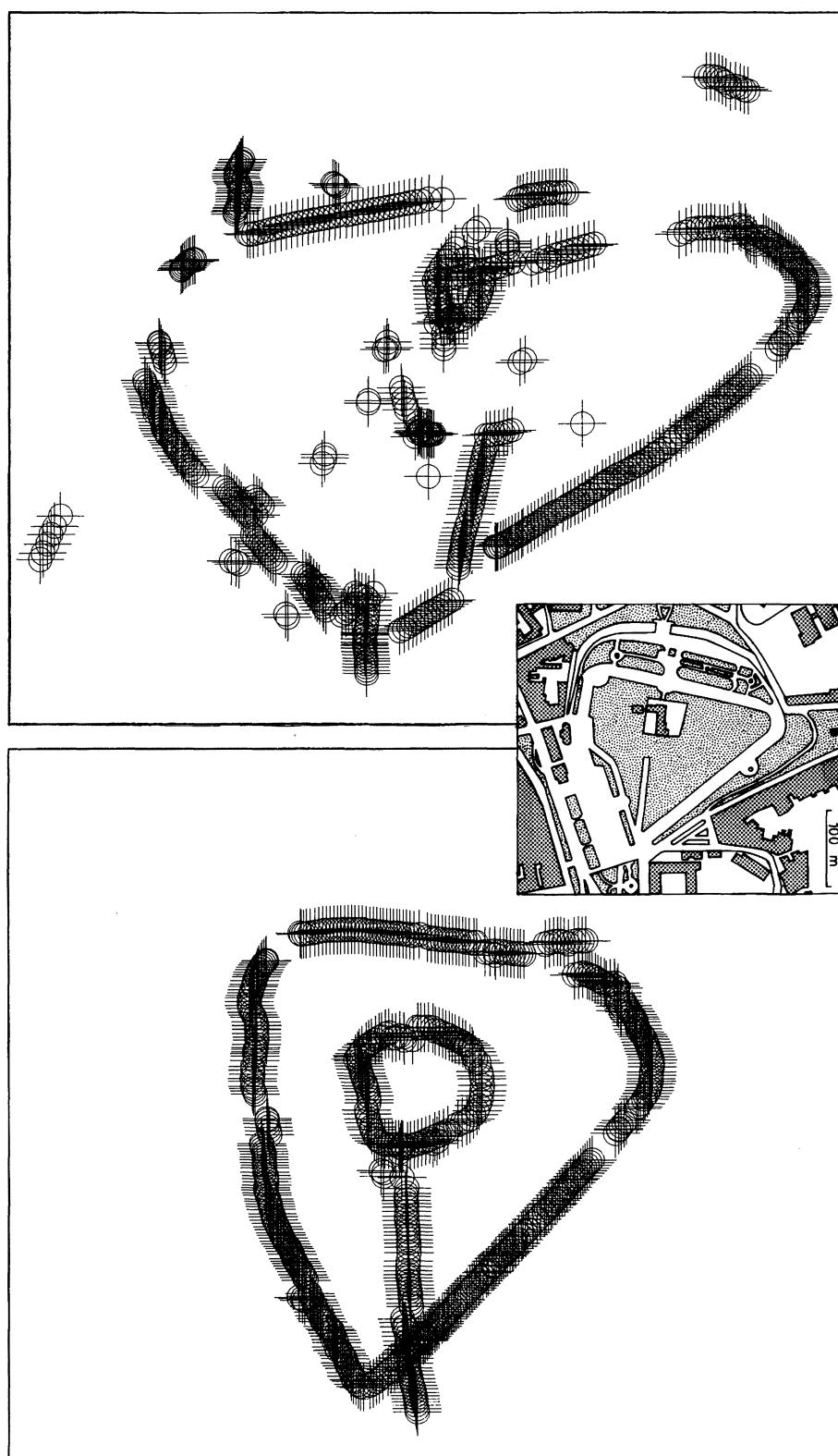


Fig. 4. Ejemplo de corrección diferencial de la delimitación y contorno de un yacimiento arqueológico.

T. P., 54, n.º 1, 1997

cuya dimensión no supere los 100 m de diámetro y para su delimitación siempre que se persiga la representación de los mismos en cartografías de escalas intermedias. En cartografías de detalle es recomendable la utilización del GPS con todo tipo de entidades materiales, sea cual sea su dimensión.

El posicionamiento con coordenadas GPS no diferenciales tiene un margen de error lo suficientemente grande como para que los resultados sean inoperantes e ineficaces en proyectos que buscan o pretenden aproximaciones inferiores a la centena de metros en la localización o delimitación de elementos de naturaleza arqueológica. Cuando la escala de trabajo permita errores superiores resulta adecuada. Sirva como ejemplo la localización de elementos arqueológicos en zonas de una extensión muy amplia y desconocida por ejemplo, ambientes desérticos.

Los trabajos de gran precisión, como pueden ser las evaluaciones de impacto o, por ejemplo, la localización de petroglifos en Galicia, necesitan de una precisión inferior a la decena de metros, por lo que la única tecnología recomendable, en este momento, es la corrección diferencial de coordenadas GPS. Esta advertencia es especialmente significativa para el mundo arqueológico, aunque no sólo éste debería ser el destinatario de la misma.

Agradecimientos

A Víctor Fernández, Paloma Mier y Marta Fernández por la información suministrada en diferentes momentos, a Anxo Rodríguez Paz quien se ocupó de la elaboración de la parte gráfica del trabajo y a Felipe Criado Boado por las correcciones y sugerencias realizadas durante la redacción del texto.

BIBLIOGRAFÍA

- ACKROYD, N. y LORIMER, R. (1990): *Global navigation: a GPS user's guide*. Lloyd's of London Press Ltd. Cardiff.
- DARE, P. (1994): "Mapping ancient saxon fish traps using GPS". *GPS World*, 5-2: 28-36.
- DEVELOPED BY RTCM SPECIAL COMMITTEE (1991): *RTCM recommended standards for differential Navstar GPS Service* Versión 2.1. Developed by RTCM Special Committee. Washington.
- ENGLISH HERITAGE (1995): *Archaeology Review 1994-1995*. English Heritage. London.
- FLETCHER, M. y SÁNCHEZ, D. (1994): "Etched in stone: recovering Native American Rock Art". *GPS World*, 5-10: 20-29.
- HURN, J. (1993a): *GPS, una guía para la próxima utilidad*. Grafinta S.A. Madrid.
- (1993b): *GPS diferencial explicado claramente*. Grafinta S.A. Madrid.
- LEICK, A. (1990): *GPS satellite surveying*. Wiley - Interscience publication. Orono.
- LETHAM, L. (1995): *GPS made easy: Using Global Positioning System in the outdoors*. The Mountaneers. Calgary.
- LOGSDON, T. (1995): *Understanding the navstar GPS, GIS and IVHS*. Van Nostrand Reinhold. New York.
- NAVTECH SEMINARS & NAVTECH BOOK AND SOFTWARE STORE, INC (1991): *Navstar GPS user equipment, an introduction*. Navtech Seminars & Navtech Book and Software Store, INC. Los Angeles.
- PURSER, M. y SHAW, S. (1995): "The town beneath the pasture: Rio Vista rediscovered". *GPS World*, 6-2: 30-40.
- SHOPE, S.; MURPHY, L. y SMITH, T. (1995): "Found at Sea: Charting Florida's sunken Treasures". *GPS World*, 6-5: 22-34.
- WELLES, D. (1987): *Guide to GPS positioning*. Canadian GPS Associates. New Brunswick.